

УДК 630*432

DOI 10.48612/ntp/kx7h-brxm-7gbz

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ ПОДГОТОВКИ ЛЕСА

С. П. КАРПАЧЕВ, О. В. ТОКАРЕВА

Академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Москва

E-mail: karpachevs@mail.ru, oliatok@mail.ru

Зональная технология очистки лесных участков от валежника исследована как инженерно-техническое средство снижения пожарной опасности и элемент противопожарного обустройства. Обосновано применение комбинированного метода утилизации горючих материалов: раскряжевка стволовой части на короткомерные сортименты и измельчение вершинных остатков в щепу. Определен оптимальный состав технологического комплекса в составе многооперационной машины с харвестерной головкой, рубительной установки и накопителя пачек. Исследованием лесных массивов методом имитационного моделирования на цифровых моделях установлено, что предложенная зональная технология обеспечивает скорость очистки леса от валежника, превышающую традиционные ручные методы, используемые в настоящее время в лесничествах, в 40–60 раз, и позволяет поддерживать лес в состоянии IV–V класса природной пожарной опасности круглый год.

Ключевые слова: лесные горючие материалы, снижение пожарной опасности, противопожарная подготовка леса, имитационное моделирование.

DIGITAL MODELING OF FOREST FIRE PREVENTION TECHNOLOGIES

S. P. KARPACHEV, O. V. TOKAREVA

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,

Russian Federation, Moscow

E-mail: karpachevs@mail.ru, oliatok@mail.ru

A zonal technology for clearing deadwood from forest areas was studied as an engineering and technical means of reducing fire hazard and as a component of fire safety measures. A combined method for combustible material utilization was justified: cutting the trunk into short-length logs and chipping the top residue. The optimal composition of the process system, consisting of a multi-operation machine with a harvester head, a chipper, and a bundle storage unit, was determined. Simulation modeling on digital forest models revealed that the proposed zonal technology ensures forest clearance rates of deadwood 40-60 times higher than those of traditional manual methods currently used in forestry operations, and allows forests to be maintained at a natural fire hazard class IV-V year-round.

Keywords: forest combustible materials, fire hazard reduction, forest fire preparation, simulation modeling.

Введение

Пожарная безопасность лесных территорий во многом определяется количеством и состоянием растительных горючих материалов [1], среди которых особую роль играет валежник – стволы отмерших деревьев или их части, лежащие на земле (согласно ОСТ 56-108-98) (рис. 1).

Являясь проводником горения, валежник относится к наиболее пожароопасным растительным материалам: устойчивое горение

возможно уже при его концентрации 0,2 кг/м² и влажности 25–30 % [2]. Накопление древесины отпада свыше 20 м³/га существенно повышает риск возникновения и распространения лесных пожаров, что обуславливает необходимость проведения мероприятий по уборке захламленности леса¹.

Статистические и натурные данные подтверждают актуальность проблемы. Так, по сведениям О. Н. Кранкиной с соавт. [3], запас сухостойных деревьев и валежника в Ленинградской области достигает 19 м³/га. Исследования

© Карпачев С. П., Токарева О. В., 2026

¹ Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий. Приложение 2 к приказу Рослесхоза от 29.12.2007. № 523. 32 с.

Н. А. Малышева с соавт. [4] показывают, что в среднем по 15 лесным районам России запас валежника составляет $16 \pm 6 \text{ м}^3/\text{га}$, при этом на его долю приходится 55,3 % от общего объема древесного детрита. В сосновых насаждениях подтаёжно-лесостепного района Средней Сибири по данным Н. В. Козлова с соавт. [5] этот показатель варьируется от 1,80 до $14,83 \text{ м}^3/\text{га}$.



Рис. 1. Захламленный валежником лес (Московская область, фото автора)

Научная новизна заключается в разработке зональной технологии снижения пожарной опасности лесов, основанной на дифференцированной обработке валежника с учетом его плотности пространственного распределения на территории леса и индивидуальных характеристик каждого валежника, что в сочетании с многооперационной машиной обеспечивает переход от реагирования на уже возникшую захламленность к системному, упреждающему снижению рисков пожаров.

В статье рассматриваются некоторые вопросы повышения пожарной безопасности лесных массивов путем регулирования плотности пространственного распределения валежника на территории леса в рамках противопожарной подготовки лесов. Под плотностью пространственного распределения валежника мы здесь понимаем запас валежника ($\text{м}^3/\text{га}$) с

учетом особенностей его распределения на участке леса.

Существующие технологии

Мероприятия по уборке валежника в лесничествах планируются и проводятся в рамках противопожарной подготовки леса. Основная цель таких работ – снижение его пожароопасности, поскольку накопленный валежник является лесным горючим материалом, способствующим быстрому распространению низового пожара.

Однако радикальное решение – полное удаление всего валежника из леса – не является оптимальным. Эта древесина выполняет значимые экологические функции: в процессе разложения она превращается в гумус, обогащая почву питательными веществами и поддерживает биогеохимические циклы [6, 7, 8]. Полное удаление из леса крупной древесины отпада нарушает естественные биогеохимические процессы. Кроме этого, валежник может быть использован как биотопливо, например, реализован в качестве дров населению. Таким образом, эта древесина играет важную социально-экономическую и экологическую роль, что необходимо учитывать при проведении противопожарных мероприятий.

В настоящее время лесничества при проведении противопожарной подготовки леса используют, в основном, две технологии уборки валежника:

1. Раскряжевка валежника на бревна длиной 1,0–1,5 м и укладка их в поленья для перегнивания.

Такой метод снижает пожароопасность за счет уменьшения плотности пространственного распределения валежника по территории леса. Древесина естественного отпада распределяется в лесу равномерно, образуя сплошной слой горючего материала, по которому огонь может быстро перемещаться. Бревна, полученные в результате раскряжевки стволовой части валежника, концентрируют в поленья объемом 1–5 м^3 , которые удалены друг от друга, что препятствует распространению огня по территории.

Недостатком этого способа является то, что поленья можно формировать только из бревен, выпиленных из стволовой части валежника. Вершинки, сучья и ветки остаются на месте. Такой мелкий валежник ($d < 7 \text{ см}$) считается более пожароопасным, чем крупный (стволовая часть). Мелкий валежник – основной проводник огня, который способствует распространению пожара [9]. В практике очистки леса, мелкий валежник обычно сжигают. Такой способ очистки пожароопасен, поэтому он строго регулируется Правилами пожарной безопасности в лесах,

утверждёнными Постановлением Правительства РФ №1614 от 07.10.2020.

2. Измельчение валежника на щепу с разбросом ее по поверхности почвы.

Преимущество этого способа в том, что он не использует сжигание, исключая риски возникновения пожара. Пожароопасность леса снижается потому, что щепы, равномерно распределённые по почве, не образуют скоплений, способных к тлению. Слой измельчённой древесины работает как мульча: он снижает испарение влаги с почвы, удерживает влагу и не даёт разгораться поверхностному огню [10].

Такой подход к очистке леса с измельчением валежника основывается на результатах научных исследований [11, 12, 13, 14], подтверждающих положительное влияние щепы на лесную экосистему, поскольку по сравнению с целыми стволами она быстрее разлагается и возвращает в почву питательные вещества. Во избежание перекрытия доступа кислорода к почве необходимо соблюдать противопожарные и экологические требования, в частности, толщина слоя щепы не должна превышать 5–10 см, а её кучевое хранение недопустимо из-за риска самовозгорания вследствие биохимических процессов во внутренних слоях измельчённой древесины.

К недостатку этого способа можно отнести многократное увеличение площади поверхности щепы по сравнению с исходным бревном (в 5–10 раз). Увеличение площади ведет к быстрому снижению влажности щепы в жаркую погоду. Влажность лесного горючего материала является одним из главных показателей пожарной опасности леса. Высокая вероятность возникновения лесного пожара отмечается при значениях влажности не ниже третьего класса пожарной опасности, что подчеркивает значимость этого фактора в формировании очагов лесных пожаров [15].

Различные исследования показали, что возникновение лесных пожаров связано с пожароопасным периодом по условиям погоды и вовлечением в горение лесных материалов [16]. Поэтому, в наиболее сухих типах лесов, пожаров происходит гораздо больше по количеству и по площади, из-за чего необходимо проводить дополнительные противопожарные мероприятия, направленные на снижение запасов лесного горючего материала [17, 18, 19]. Оставление валежника в объемах, превышающих естественные накопления конкретного типа леса (например, более 10–15 м³/га для сухих боров), резко повышает интенсивность горения [20].

Анализ и сравнение применяемых на практике способов уборки валежника для снижения пожароопасности леса позволяет сделать следующие обобщенные выводы:

Применяемые в лесничествах технологии – раскряжевка валежника на бревна с формированием полениц и измельчение валежника на щепу с распределением ее по поверхности почвы – снижают сплошность горючего лесного материала и устраняют условия, благоприятные для тления и распространения огня. Однако каждая из технологий имеет существенные недоработки:

– Раскряжевка валежника и формирование полениц эффективно уменьшает протяженность сплошного горючего слоя, но не устраняет мелкий валежник, который характеризуется высокой горючестью и низкой влажностью. Его удаление осуществляется путём контролируемого сжигания, что само по себе несет риск возникновения пожаров, особенно в периоды с высокой пожарной опасностью по погодным условиям.

– Измельчение позволяет избежать сжигания и способствует улучшению водного режима почвы за счёт мульчирующего эффекта. Однако резкое увеличение удельной поверхности древесины приводит к ускоренному высыханию щепы, особенно при высокой температуре воздуха. Это создаёт условия, при которых измельчённый валежник может перейти в категорию высокоопасных горючих материалов, особенно при плотной укладке и отсутствии регулярного увлажнения.

Кроме того, оба метода имеют общие недостатки:

– Весь объём валежника остается в лесу, что может приводить к постепенному накоплению этого горючего материала, особенно в регионах с низкой скоростью разложения древесины. Таким образом, природная пожарная опасность, вызванная оставлением в лесу всего объема валежника, сохраняется.

– Не учитывается разная горючесть валежника в зависимости от степени его разложения и размерных характеристик. Например, при измельчении валежника не учитывается разная горючесть щепы, получаемой из валежника I-II степени разложения и III-V. Также не делается различие между щепой, получаемой из крупного и мелкого валежника. Вся получаемая щепа без селекции разбрасывается по лесной территории.

– Не учитывается плотность пространственного распределения валежника на территории леса (степень захламленности и концентрации). Даже при высокой захламленности вся древесина переработанного валежника остается в лесу.

– Уборка валежника ориентирована на выполнение требований пожарной безопасности и в меньшей степени учитывает экологические требования, при этом, совсем не

принимает во внимание социально-экономические. Реализация щепы и бревен как биотоплива при проведении противопожарных мероприятий не планируется.

Цель работы – научно обосновать и разработать технологию снижения пожароопасности в лесах за счёт зонирования лесных участков по плотности пространственного распределения валежника на территории леса и индивидуальной обработки каждого отдельного валежника с учётом степени его разложения и размерного состава, что позволит повысить пожарную безопасность леса и сбалансированно сочетать экологические и социально-экономические аспекты управления лесными ресурсами.

Предлагаемая технология

В целях повышения эффективности противопожарных мероприятий в лесах, на основе анализа существующих технологий, нами предлагается зональная технология снижения пожароопасности через индивидуальную обработку каждого отдельного валежника (далее – зональная технология). По этой технологии сначала проводится обследование и деление лесных участков в зависимости от плотности пространственного распределения валежника на территории леса, а затем осуществляется оценка и обработка каждого отдельного валежника.

На основе данных о степени захламленности леса, территория разбивается на зоны захламленности с учетом пожарной опасности. Например, используя нормативные документы², можно ввести три зоны захламленности (конкретные цифры могут корректироваться в зависимости от региона, типа леса и других факторов):

- низкая (до 5–10 м³/га) – не требует очистки;
- средняя (10–20 м³/га) – требует очистки, но вся древесина остается в лесу на перегнивание;
- высокая (свыше 20 м³/га) – требует очистки, часть древесины остается в лесу, а часть вывозится, доводя захламленность до допустимого уровня (5–10 м³/га).

В выделенных зонах проводится индивидуальная оценка каждого обнаруженного валежника по следующим параметрам:

- степень разложения (по 5 группам);
- размерный состав (мелкий, крупный).

После оценки, принимается решение о переработке данного валежника на щепу или на короткомерные бревна с учетом пожарной опасности.

Учёт стадии разложения:

Валежник I–II стадии разложения – содержит много сухой древесины, хорошо горит. Его частичная раскряжёвка и укладка в поленицы позволяет:

- убрать толстые, медленно разлагающиеся стволы с территории леса;
- реализовать древесину, например, как дрова для населения, не оставляя её в лесу как источник пожара.

Валежник III–V стадии разложения – частично или полностью разложился, служит питанием для микроорганизмов и мало горюч. Однако, при большой плотности пространственного распределения валежника на территории леса, он может способствовать распространению огня по подстилке. Его полное измельчение предотвращает это.

Учёт размерного состава валежника:

Мелкий валежник ($d < 7$ см) – быстро высыхает и является проводником пожара. Его измельчение и разбрасывание по территории (или удаление из леса) в виде щепы устраняет этот риск.

Предлагается следующая последовательность операций с валежником:

- Валежник I–II стадии разложения частично (стволовая часть) раскряжевывается на короткомерные бревна с укладкой в поленицы. Вершина, ветки и сучья – измельчаются на щепу.
- Мелкий валежник ($d < 7$ см) и валежник III–V стадии разложения полностью измельчаются на щепу.

Новизна предложенной зональной технологии снижения пожароопасности в лесах заключается в комплексном, дифференцированном подходе к обработке валежника на основе двухуровневой оценки: территориальной зональности и индивидуальных характеристик каждого отдельного валежника.

Зональная технология:

1. Вводит чёткое зонирование лесных массивов по объёмам захламлённости валежником с четко обоснованными пороговыми значениями (низкая, средняя, высокая степени захламленности). Наиболее пожароопасные избыточные объёмы валежника (I–II стадии разложения и мелкий) полностью перерабатываются на щепу и удаляются из леса. Вывоз избыточных объёмов валежника исключает

² Приказ Рослесхоза от 09.06.2015 № 182 «Об утверждении методического документа по обеспечению санитарной безопасности в лесах»

накопление горючего материала в лесу. Это особенно важно в пригородных лесах и в лесопарковых территориях с высоким антропогенным воздействием.

2. Осуществляет в каждой выделенной зоне индивидуальную оценку каждого отдельного валежника по двум параметрам – стадии разложения и размерному составу, что обеспечивает достаточно точное определение его пожарного потенциала и выбор оптимального способа переработки: измельчение на щепу или раскряжэвка на бревна.

Концептуальная модель мобильной машины для уборки валежника

Для практической реализации зональной технологии в работе предложена концептуальная модель мобильной машины для уборки валежника (КММ). КММ разработана на базе запатентованного автором устройства [21], что подтверждает новизну предлагаемых в настоящей работе технических решений.

КММ объединяет в себе операции захвата, раскряжэвки, накопления и измельчения валежника, а также транспортировку из леса избыточных объемов древесины валежника в виде щепы, обеспечивая таким образом не только очистку леса от валежника, но и комплексное использование этой древесины, например, как топливной щепы. Машина базируется на серийном тракторе и комплектуется манипулятором с харвестерной головкой, накопителем короткомерных бревен (до 2 м) и рубильной машиной. Харвестерная головка позволяет при необходимости срезать мешающие движению пожарных машин деревья (в настоящей статье эта функция не рассматривается). Дополнительно КММ комплектуется прицепом-бункером для щепы объемом 12 м³.

Работа КММ осуществляется по следующему алгоритму (рис. 2):

КММ 1 движется по волоку от одной рабочей зоны с валежником к другой. Рабочие зоны представляют собой участки леса с валежником, ограниченные вылетом манипулятора КММ. В каждой рабочей зоне КММ останавливается для захвата стволов валежника 2 в пределах досягаемости манипулятора 3. С помощью харвестерной головки 4, КММ захватывает и раскряжэвывает стволовую часть 5 на короткомерные бревна 6, которые сбрасываются в накопитель 7. Оставшуюся вершинную часть ствола с сучьями 8 харвестерная головка подает в окно рубильной машины 9. Щепа 10 под действием воздушного потока разбрасывается по земле через отводящий патрубок 11 или направляется в прицеп-бункер 13. После заполнения накопителя бревнами до заданного

объема, на пачку 12 накладывают две обвязки и сбрасывают на землю. После заполнения прицепа-бункера 13 щепой, КММ приостанавливает все операции с валежником и движется к месту разгрузки. После разгрузки щепы, КММ возвращается обратно и возобновляет работу с валежником.

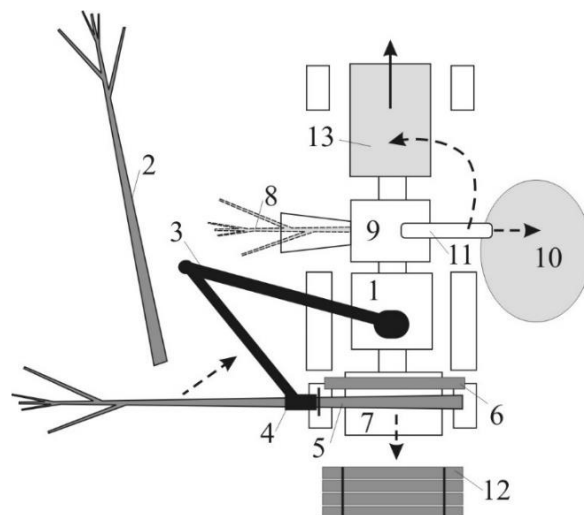


Рис. 2. Работа КММ на уборке валежника

На рисунке цифрами обозначено:

- 1 – энергетический модуль КММ; 2 – валежник;
- 3 – манипулятор; 4 – харвестерная головка;
- 5 – стволовая часть валежника;
- 6 – короткомерные бревна; 7 – накопитель;
- 8 – вершинная часть ствола;
- 9 – окно рубильной машины; 10 – щепа;
- 11 – отводящий патрубок;
- 12 – пачка короткомерных бревен;
- 13 – прицеп-бункер для щепы

Таким образом, зональная технология уборки валежника на базе КММ при проведении противопожарной подготовки леса включает производство из стволовой части валежника короткомерных бревен с формированием из них пачек и измельчение вершинной части (или всего ствола) на щепу со сбросом ее на землю или в прицеп-бункер. Такая работа КММ позволяет полностью реализовать предложенную зональную технологию.

Методы исследования

Исследования зональной технологии уборки валежника на базе КММ проводились методом имитационного моделирования [22]. Для этого была разработана цифровая модель уборки валежника, включающая математическую модель и ее компьютерную реализацию на языке GPSS Word.

Имитационное моделирование направлено на оценку эффективности зональной

технологии очистки леса от захламлённости валежником с учётом возможностей и ограничений КММ и проверку соответствия её работы требованиям предложенного метода.

В качестве показателя эффективности принята площадь леса, очищаемая КММ от валежника за 1 ч (т.е. скорость очистки леса).

Для формализации технологических процессов работы КММ использована теория массового обслуживания. В рамках принятой модели манипулятор с харвестерной головкой, рубительная машина и накопитель рассматриваются как обслуживающие приборы, а рабочие области, валежник, короткомерные брёвна и пачки брёвен – как заявки на обслуживание.

Скорость очистки леса с помощью КММ определяется количеством стволов валежника (заявок на обслуживание), проходящих через механизмы устройства (обслуживающие приборы) в час. Блок-схема работы КММ представлена на рис. 3. Согласно схеме на рис. 3, в системе циркулируют заявки разного уровня.

Заявки первого уровня – это принятое в модели число рабочих областей очистки, которые КММ очищает от валежника. Рабочая область – это площадь части зоны леса, очищаемая КММ с одной стоянки.

Заявки второго уровня – это количество валежника на каждой рабочей области, $n_{вал}$.

Заявки третьего уровня – это количество короткомерных бревен, которое получают из одного ствола валежника.

Заявки четвертого уровня – это количество пачек, сформированных из короткомерных бревен.

Заявки первого уровня (31) поступают в систему из источника И. Эти заявки поступают в канал K_1 . Канал K_1 – это обслуживающий прибор, который имитирует время на передвижение КММ к рабочей области. Далее заявка первого уровня распадается на заявки второго уровня (32) – это количество валежника, находящегося в пределах рабочей области. После этого каждая заявка второго уровня распадается на заявки третьего уровня (33) – это количество короткомерных бревен, которые получают из соответствующего ствола валежника. Заявки третьего уровня попадают в канал K_2 – это обслуживающий прибор, имитирующий работу манипулятора с харвестерной головкой, который захватывает валежник, доставляет его к накопителю и раскрывеживает его на бревна. Заявки четвертого уровня – это пачка бревен в накопителе (34). После того как количество бревен в накопителе достигает заданного, пачка попадает в канал K_3 – это обслуживающий прибор, имитирующий работы по обвязке и сбросу пачки бревен на землю. Как только все заявки второго и третьего уровня будут обслужены, в

систему поступает следующая заявка первого уровня.

Описанную логику работы системы реализуют клапаны Кл1, Кл2 и Кл3, которые управляют потоками заявок всех уровней.

Отметим, что после подачи древесины в окно рубительной машины манипулятор, не ожидая окончания ее измельчения, сразу наводится на захват следующего ствола валежника. Если в пределах рабочей области нет валежника, то манипулятор переводится в транспортное положение и КММ передвигается к следующей рабочей области с валежником. Такая технология позволяет не учитывать циклы времени работы рубительной машины в схеме на рис. 3. Для моделирования вывоза валежника в виде щепы, в программу была включена логика работы КММ с прицепом-бункером. Как только прицеп-бункер заполнялся щепой, все операции с валежником, показанные на схеме рис. 3 останавливались и моделировался цикл времени на транспортировку прицепа-бункера со щепой к месту разгрузки и возврат КММ обратно. После этого, все остановленные операции возобновлялись.

Число заявок второго уровня зависит от размеров рабочей области и запаса валежника.

Площадь рабочей области КММ определяется вылетом манипулятора [23, 24]. Манипулятор КММ предназначен для подтягивания валежника к машине. Для таких условий работы подходят сверхдлинные манипуляторы с вылетом до 15 м с рабочей областью охвата до 400 м².

Если на лесном участке запас валежника $V_{вал}$, м³/га при среднем объеме одного ствола валежника $v_{вал}$, м³, то в рабочую область попадает $n_{вал}$ стволов валежника:

$$n_{вал} = \frac{0,04 \cdot V_{вал}}{v_{вал}} \quad (1)$$

Объем ствола валежника можно определить по диаметру, длине и видовому числу по формуле таксации:

$$v_{вал} = \frac{\pi \cdot d^2}{40000} \cdot l \cdot f, \quad (2)$$

где d – диаметр ствола валежника, см;
 f – видовое число 0,5;
 l – длина ствола валежника, м.

Число заявок третьего уровня зависит от длины ствола валежника. В практике таксации высоту дерева принято определять через его диаметр.



Общая длина каждого ствола валежника вычислялась в зависимости от его диаметра по нелинейной формуле [29]:

Площадь леса S_{hour} , очищаемая КММ от валежника за час T_{hour} :

38

где T_i – время i -ого цикла КММ очистки от валежника j -ой рабочей области с учетом переезда между рабочими областями, с;

S_j – площадь j -ой рабочей области, очищенной от валежника во время i -ого цикла работы КММ, м²;

n – число полных циклов работы КММ за час.

Для получения статистически значимых результатов моделировалась работа КММ в течение 100 смен.

Результаты и обсуждение

Результаты проведенных экспериментов частично отражены на рис. 4.

Из графика на рис. 4 следует, что площадь леса, очищаемая машиной КММ от валежника за час (скорость очистки леса, га/ч), зависит как от запаса валежника, так и от способа его переработки, то есть, от доли стволовой части, которую раскряжевывают на короткомерные бревна и доли измельчения на щепу.

Так, при запасе валежника 20 м³/га (это соответствует границе допустимой захламленности леса) и доли раскряжки 0,7 длины ствола на короткомерные бревна с последующей укладкой их в пачки, скорость очистки леса составляет 0,163 га/ч. При увеличении запаса валежника до 60 м³/га (сильное захламление леса) скорость снижается до 0,059 га/ч (снижение почти в 2,8 раза), что обусловлено возрастанием времени на операции по сбору и раскряжке стволов валежника с единицы площади леса.

Переход к полной переработке валежника на щепу позволяет существенно повысить скорость очистки леса. Так, например, при фиксированном запасе валежника 30 м³/га (средняя захламленность леса) скорость очистки составляет 0,118 га/ч при доле раскряжки 0,7 длины ствола, а при переработке всего ствола на щепу – 0,393 га/ч (рост более чем в 3,3 раза).

Результаты моделирования показали, что увеличение запаса валежника с 20 до 60 м³/га приводит к снижению скорости очистки леса в 2,5–2,7 раза при всех способах переработки валежника. Слабая зависимость этого эффекта от способа переработки указывает на то, что плотность распределения валежника на территории леса выступает доминирующим фактором, тогда как доля раскряжки проявляет себя как второстепенный параметр.

При варьировании доли раскряжки при разных фиксированных значениях запаса валежника, скорость очистки возрастает в 2,0–3,3 раза, однако размах колебаний в этой динамике существенно зависит от исходного запаса валежника. Полученные данные свидетельствуют о нелинейном характере взаимосвязи и

подчеркивают необходимость учёта запаса валежника при выборе способа переработки валежника.

Для случая вывозки части древесины валежника в виде щепы за пределы лесного массива, были проведены дополнительные эксперименты. В качестве типового оборудования выбран прицеп-бункер объёмом 12 м³, среднее расстояние транспортировки составило 100 м. Знание емкости прицепа-бункера позволяет контролировать объем вывезенной древесины валежника из данной зоны. Результаты экспериментов отражены на рис. 4.

Анализ полученных данных показывает, что характер зависимости скорости очистки от запаса валежника сохраняется как при оставлении щепы в лесу, так и при её вывозке. Однако, при добавлении в технологический цикл операции транспортировки наблюдается снижение скорости очистки леса.

Так, при запасе валежника 20 м³/га скорость обработки участка составляет 0,466 га/ч при оставлении щепы на месте и снижается до 0,330 га/ч – при вывозке. Это соответствует снижению скорости очистки в 1,4 раза. При увеличении запаса до 60 м³/га разница возрастает до 1,5 раз, что свидетельствует о стабильности влияния транспортной операции на общую скорость очистки леса.

Результаты подтверждают, что снижение скорости очистки при вывозке древесины мало зависит от объёма валежника и остаётся в пределах 1,4–1,5 раз в диапазоне 20–60 м³/га. Это позволяет использовать единый поправочный коэффициент при расчёте сроков выполнения противопожарных работ.

Результаты экспериментальных исследований подтверждают эффективность функционирования КММ при реализации всех режимов зональной технологии снижения пожарной опасности леса. Ключевая особенность метода заключается в возможности индивидуальной обработки отдельных единиц валежника и частичной вывозки этих лесных горючих материалов за пределы лесного массива. Это позволяет учитывать структуру и плотность распределения валежника на территории леса при противопожарном обустройстве лесов.

С практической точки зрения, результаты важны для планирования противопожарных мероприятий в весенне-летний период. Переработка валежника и удаление части этого горючего материала из леса по зональной технологии снижает пожарную нагрузку и соответствует требованиям Правил пожарной безопасности в лесах, особенно в местах, прилегающих к населённым пунктам. При этом, следует учитывать влияние на скорость очистки леса факторов плотности пространственного

распределения валежника на территории леса и способов его переработки. Так, например, технологическая сложность и временные затраты на вывозку древесины валежника за пределы лесного массива могут замедлить темпы очистки леса.

Таким образом, компромисс между экологической безопасностью, социально-экономическими аспектами и оперативностью выполнения противопожарных мероприятий требует

взвешенного подхода. Так, при высокой пожарной опасности предпочтение может быть отдано переработке всего валежника на щепу и вывозке ее за пределы леса, тогда как на обширных участках с низкой пожарной опасностью допустимо оставление всей древесины собранного и переработанного валежника в лесу с последующим контролем пожарной обстановки.

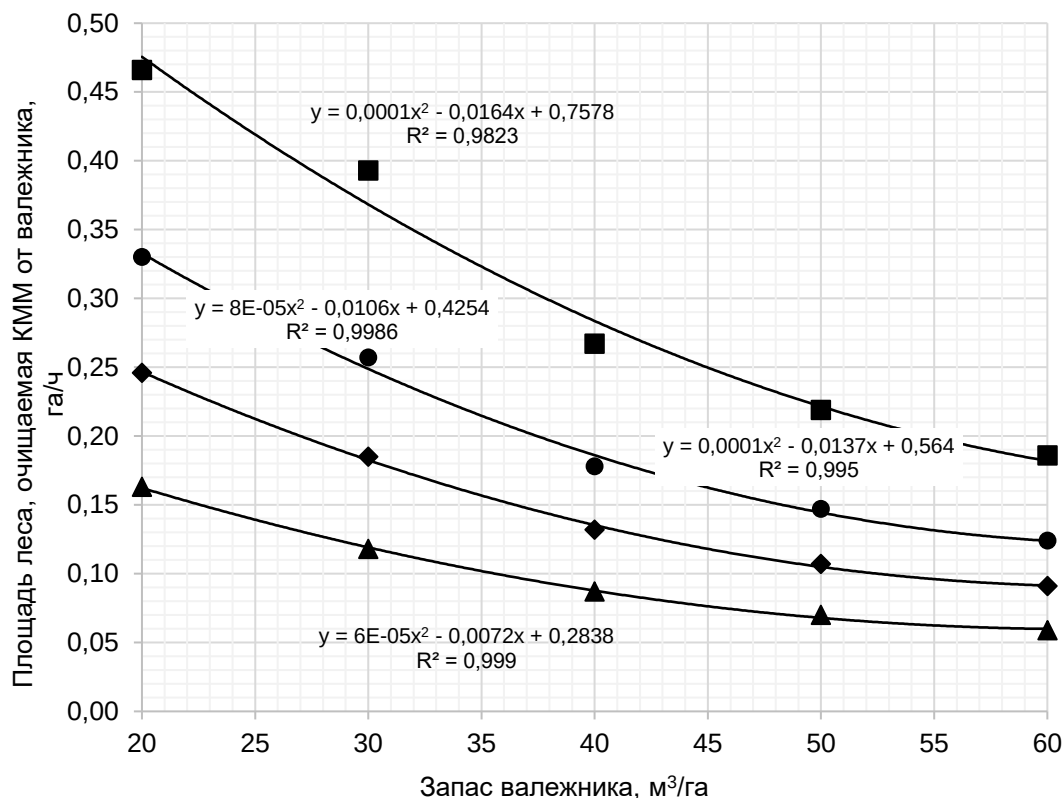


Рис. 4. Показатели очистки леса в зависимости от запаса валежника.

На графике обозначено: ■ – раскряжевка 0,7 длины ствола на бревна и 0,3 – на щепу;

◆ – раскряжевка 0,3 длины ствола на бревна и 0,7 – на щепу;

▲ – переработка всего валежника на щепу с оставлением всей щепы в лесу;

● – переработка всего валежника на щепу с вывозкой щепы из леса.

Оценим преимущества зональной технологии по сравнению с применяемой в настоящее время в лесничествах технологии ручной очистки леса от валежника. Эти преимущества будем рассматривать с позиции снижения пожарной опасности леса, а также возможностей необходимых действий в экстремальный пожароопасный период и при возникновении возгораний.

Пожарная опасность леса оценивается по двум основным направлениям: природной пожарной опасности (характеристика лесорастительных условий) и пожарной опасности по условиям погоды (зависит от метеорологических условий)³. Если для оценки пожарной опасности по условиям погоды разработана четкая методика и имеется комплексный количественный показатель пожарной опасности (ППО), то оценка природной пожарной

³ ГУ МЧС по Архангельской области. Пожарная опасность в лесах. Классы пожарной опасности. [сайт]. URL: [https://29.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-](https://29.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/rekomendacii-naseleniyu/pozharnaya-opasnost-v-lesah-klassy-pozharnoy-opasnosti)

[informaciya/rekomendacii-naseleniyu/pozharnaya-opasnost-v-lesah-klassy-pozharnoy-opasnosti](https://29.mchs.gov.ru/deyatelnost/poleznaya-informaciya/rekomendacii-naseleniyu/pozharnaya-opasnost-v-lesah-klassy-pozharnoy-opasnosti) (дата обращения: 18.04.2026)

опасности более сложная и единой методики нет. Часто используют оценки по обобщенным (классическая шкала И. С. Мелехова) или региональным шкалам [32].

При сравнении технологий, степень пожарной опасности леса будем оценивать по классу природной пожарной опасности. Захламленные валежником леса ($>20 \text{ м}^3/\text{га}$) обычно относят к I классу природной пожарной опасности (очень высокая, когда лес может находиться в состоянии пожарной опасности весь год вне зависимости от погоды). Неполная очистка леса от валежника (допустимо оставлять после очистки $V_{\text{вал}} < 5 \text{ м}^3/\text{га}$) позволяет, в зависимости от характеристики лесорастительных условий, перейти ко II-III классу (высокая и средняя, когда лес может находиться в состоянии пожарной опасности в зависимости от погоды), а полная очистка леса от валежника – к IV-V классу природной пожарной опасности (ниже средней и низкая, когда возникновение пожара возможно только при особо неблагоприятных погодных условиях).

Оценим преимущества зональной технологии на примере Хотьковского участкового лесничества (Сергиево-Посадский городской округ Московской области). В 2022 году в лесничестве уборку валежника проводили на 8 гектарах⁴.

Уборка валежника в лесничествах обычно проводится бригадой из 2-3 человек. Состав работ включает раскряжевку валежника на бревна, ручную переноску бревен и укладку их в поленицы. Согласно действующим нормам выработки⁵ при ручной очистке леса от валежника выработка на одного рабочего составляет 3,0-4,5 скл. (складочных) $\text{м}^3/\text{смену}$, что соответствует 1,8-2,7 пл. (плотных) $\text{м}^3/\text{смену}$.

При средней захламленности леса $30 \text{ м}^3/\text{га}$ для полной очистки 8 га потребуется удалить 240 м^3 валежника. Основные показатели ручной уборки валежника:

- трудозатраты 710–1067 чел·ч;
- потребное число смен для бригады из 3 рабочих – 30–45 смен (при 8-часовом рабочем дне – 1–1,5 месяца).

Зональная технология (с использованием КММ) обеспечивает те же операции, но с значительно большей производительностью:

- трудозатраты – 68 чел·ч;
- потребное число смен при работе КММ с одним оператором – 8–9 смен.

Таким образом, скорость очистки леса по сравнению с ручной очисткой леса бригадой

из 3-х рабочих сокращается в 3,5–5,2 раза, а в пересчете на одного рабочего в 10,5–15,6 раза.

Зональная технология с раскряжевкой валежника на бревна при двухсменной работе КММ может полностью очистить от захламленности до 1000 га леса. Потребности лесничеств обычно значительно меньше. Например, общая площадь проблемных захламленных участков леса в Сергиево-Посадском лесничестве, не превышают 200 га. За счет высокой скорости очистки леса зональная технология позволяет обеспечить очистку этих участков и за счет уборки всего валежника снизить природную пожарную опасность леса.

Зональная технология уборки валежника предусматривает систематическую очистку с вывозкой избыточного горючего материала за пределы лесного массива. В отличие от ручного метода, при котором уборка проводится только раз в год и валежник накапливается, зональная технология позволяет поддерживать лес в состоянии IV–V класса природной пожарной опасности на постоянной основе. При существующей практике ручной уборки валежника класс природной опасности колеблется от I (до очистки) до III–IV (после), что создает большие предпосылки для возникновения лесного пожара в течение большей части года.

В случае угрозы пожара время уборки валежника может быть еще больше сокращено за счет переработки всего валежника на щепу (без раскряжевки на бревна и укладки их в пачки). В этом случае трудозатраты на очистку 8 га снижаются до 17,2 чел·ч, а скорость очистки увеличивает в 40–60 раз по сравнению с ручной технологией, что особенно важно при организации в лесу подъездных путей для пожарных машин.

Выводы

Рассмотрена зональная технология снижения пожароопасности лесов, основанная на дифференцированной обработке валежника с учетом как плотности пространственного распределения валежника на территории леса, так и индивидуальных параметров каждого валежника – размерных характеристик и степени разложения древесины. Такой подход позволяет оценивать горючесть каждого валежника, а также определять приоритетность и методы его обработки, повышая эффективность противопожарных мероприятий.

Для реализации на практике зональной технологии разработана концептуальная модель мобильной машины (КММ). КММ основана

⁴ Лес чистят – бревна раздают // Газета «Вперёд». Новости Сергиева Посада, 30 июня 2022. [сайт]. URL: https://vk.ru/wall-21700607_33170?ysclid=ms07r5hu7941069208

⁵ Приказ Рослесхоза от 15.07.1999 № 148, редакция действует с 15 июля 1999. [сайт]. URL: https://www.glavbukh.ru/npd/edoc/99_564233332

на запатентованном устройстве и предназначена для сбора и переработки валежника на щепу или на короткомерные бревна. При этом щепа может разбрасываться на землю или направляться в прицеп-бункер для транспортировки ее за пределы лесного массива. Короткомерные бревна укладываются в пакеты и сбрасываются на землю для перегнивания.

Результаты имитационного моделирования работы КММ с цифровой моделью зональной технологии позволяют сделать следующие выводы:

1. Запас валежника является доминирующим фактором, влияющим на скорость очистки леса (га/ч). Увеличение запаса с 20 до 60 м³/га приводит к снижению производительности в 2,5–2,8 раза независимо от способа переработки. Это обусловлено возрастанием трудоёмкости операций по сбору и обработке валежника на единицу площади.

2. Способ переработки валежника (доля раскряжёвки стволов на короткомерные бревна или измельчение на щепу) оказывает значительное, но второстепенное влияние по сравнению с запасом. При запасе 30 м³/га переход от частичной раскряжёвки (доля 0,7) к полному измельчению повышает скорость очистки более чем в 3,3 раза – с 0,118 до 0,393 га/ч. Таким образом, измельчение на щепу существенно повышает эффективность работы КММ.

3. Нелинейная зависимость скорости очистки от запаса и способа переработки требует учёта обоих параметров при планировании противопожарных мероприятий. Однако,

поскольку влияние запаса валежника выражено сильнее, его следует рассматривать как ключевой критерий при выборе технологии обработки.

4. Операция вывозки щепы за пределы лесного массива с использованием прицепа-бункера объёмом 12 м³ и средним расстоянием транспортировки 100 м приводит к дополнительному снижению скорости очистки. При запасе 20 м³/га скорость падает с 0,466 до 0,330 га/ч (в 1,4 раза), при 60 м³/га – до 1,5-кратного снижения. Важно, что влияние транспортировки стабильно в диапазоне 20–60 м³/га, что позволяет использовать единый поправочный коэффициент 1,4–1,5 при расчёте сроков выполнения работ.

Преимущество зональной технологии заключается в гибкости переработки валежника, которая заключается в возможности выборочной переработки валежника с частичной вывозкой горючих материалов за пределы участка. Это позволяет адаптировать технологию под плотность распределения валежника на территории леса и индивидуальные характеристики каждого отдельного валежника.

Для практического применения зональной технологии рекомендуется:

– При высоком запасе валежника (>20–40 м³/га) отдавать предпочтение режиму полного измельчения, так как он минимизирует простои и повышает производительность.

– При необходимости вывозки щепы закладывать корректировку увеличения сроков работ на 40–50 %.

Список литературы

1. Использование систем мониторинга при фиксации направления развития и динамики природного пожара / А. О. Семенов, Д. В. Калашников, А. Г. Бубнов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 4 (57). С. 57–67. DOI: 10.48612/ntp/a1z6-x9mt-f4rh. EDN: UXTRZR

2. Мошников С. А., Ананьев В. А. Запас древесного детрита основных насаждений Южной Карелии // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, 2013. № 2. С. 22–28.

3. Coarse woody debris in forest regions of Russia / O. Krankina, M. Harmon, Yu. Kukuev [et al.]. Can. J. For. Res., 2002, issue 32, pp. 768–778.

4. Количественная оценка запасов древесного детрита в лесах Российской Федерации по данным ГИЛ [Электронный ресурс] / Н. А. Малышева, А. Н. Филиппук, Т. А. Золина [и др.] // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой

журн. 2019. № 1. С. 101–128. [сайт]. URL: https://lhi.vniilm.ru/PDF/2019/1/LHI_2019_01-09-Malysheva.pdf (дата обращения: 18.04.2026)

5. Характеристика древостоя и валежа в послепожарных осново-березовых лесах Среднего Предуралья / А. А. Алейников, А. В. Тюрин, П. Я. Грабарник [и др.] // Лесоведение. 2018. № 4. С. 258–272.

6. Евстигнеев О. И., Горнова М. В., Анищенко Л. Н. Валежник и микросукцессии в ельнике высокотравном на низинном болоте (Брянское полесье) // Russian Journal of Ecosystem Ecology. 2018. Т. 3, № 2. С. 1–16. DOI: 10.21685/2500-0578-2018-2-2. EDN: EIUPWW.

7. Крупные древесные остатки – потерянная древесина или экосистемные услуги / М. А. Кузнецов, А. Ф. Осипов, А. В. Манов [и др.] // Актуальные проблемы, направления и механизмы развития производительных сил Севера - 2024: сборник статей Девятой Всероссийской научно-практической конференции (с

международным участием). В 2-х частях, Часть I. Воронеж: Строки, 2024. С. 295–297. EDN: GDBANN.

8. Характеристика крупных древесных остатков в пихтовых насаждениях, поврежденных уссурийским полиграфом (*Polygraphus proximus* Blandf.) / А. А. Андропова, А. А. Вайс, П. В. Михайлов [и др.] // Природообустройство. 2026. Т. 19, № 2. С. 114–123. DOI: 10.26897/1997-6011-2026-2-114-123. EDN: KUQVWJ.

9. Гусев В. Г., Лопухова Е. Л., Дубовый В. К. Классификация и общие свойства лесных горючих материалов // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2012. № 1 (325). С. 134–145.

10. Цветков П. А., Кудинов Е. Н. Влияние несплошных рубок на пожароопасность сосняков Красноярской лесостепи // Хвойные бореальной зоны. 2014. Т. 32, № 3–4. С. 74–77. EDN: TUIPKH.

11. Effects of post-fire mulching with straw and wood chips on soil hydrology in pine forests under Mediterranean conditions / Manuel García Díaz, Manuel Esteban Lucas-Borja, Javier Gonzalez-Romero [et al.]. *Ecological Engineering*, 2022, vol. 182, 106720, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106720>. [сайт]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857422001811> (дата обращения: 18.04.2026)

12. The Use of Wood Chips for Revitalization of Degraded Forest Soil on Young Scots Pine Plantation / Andrzej Klimek, Stanisław Rolbiecki, Roman Rolbiecki [et al.]. *Forests*, 2020, 11 (6), 683; <https://doi.org/10.3390/f11060683>

13. Изменение свойств почвы под влиянием дорожного покрытия из древесной щепы (в условиях ГБС РАН) / Т. В. Прокофьева, К. А. Горохов, М. С. Розанова [и др.] // Природообустройство. 2025. № 5. С. 126–135. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-126-135>

14. Влияние покрытия из древесной щепы на почвы тропинойной сети ГБС РАН / Т. В. Прокофьева, М. С. Розанова, К. А. Горохов [и др.] // Актуальные проблемы урболесоведения: сборник научных трудов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, посвященной 95-летию со дня рождения члена-корреспондента РАН Л. П. Рысина. М.: Главный ботанический сад им. Н. В. Цицина РАН, 2024. С. 189–193. DOI: 10.35102/cbg.2024.22.38.039. EDN: INGKNU.

15. Особенности прогнозирования пожарной опасности лесных массивов центральной части России / О. Г. Зейнетдинова, И. Ю. Шарабанова, Р. М. Шипилов [и др.] // Современные проблемы гражданской защиты. 2018. № 2(27). С. 62–64. EDN: XWXQBV.

16. Семенов А. О., Калашников Д. В., Семенов А. Д. Особенности тушения природных пожаров на начальных этапах // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 85–93.

17. Архипов Е. В. Динамика накопления лесных горючих материалов в сосновых лесах Казахского мелкосопочника // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. 2014. № 9 (119). С. 64–68. EDN: STSLCV.

18. Процессы пожарного созревания лесных горючих материалов в лесах Саратовского лесничества Саратовской области / М. А. Козаченко, О. Г. Удалова, О. А. Ивченко [и др.] // Успехи современного естествознания. 2021. № 9. С. 5–12. DOI: 10.17513/use.37678. EDN: XMQDTP.

19. Анализ горимости лесов Забайкальского края за 2022–2024 годы / И. М. Секерин, А. М. Ерицов, Г. В. Куксин [и др.] // Международный научно-исследовательский журнал. 2025. № 3 (153). 18 с. DOI: 10.60797/IRJ.2025.153.129. EDN: TYMJFQ.

20. Залесов С. В., Осипенко А. Е., Шубин Д. А. Запасы напочвенных горючих материалов в искусственных сосняках Алтайского края // Вестник Бурятской государственной сельскохозяйственной академии им. В. Р. Филиппова. 2016. № 2 (43). С. 73–79. EDN: WAWFFP.

21. Патент на полезную модель № 196623 Российская Федерация, МПК А 01 G 23/00 (2006.01). Устройство для производства лесоматериалов на лесосеке / С. П. Карпачев, И. П. Карпачева; опубл. 06.03.2020, Бюл. № 7.

22. Modeling of cleaning up forest debris technology from wood natural mortality / S. P. Karpachev, A. A. Shadrin, O. N. Burmistrova [et al.]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 839, 012010.

23. Дербин В. М., Дербин М. В., Овчарук С. В. Технология работы харвестера при выборочных рубках // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: сборник материалов Международной научно-технической конференции. Министерство образования и науки РФ; Правительство Вологодской области; Департамент лесного комплекса Вологодской области; Вологодский государственный университет. Вологда: Вологодский государственный университет. 2016. С. 113–114.

24. Карпачев С. П., Быковский М. А., Лаптев А. В. Методика выбора манипулятора харвестера // Лесной вестник/Forestry Bulletin, 2021. Т. 25. № 1. С. 123–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

25. Лебедев А. В. Обобщенная модель распределения диаметров деревьев в сосновых древостоях // Лесной вестник/Forestry

Bulletin, 2022. Т. 26. № 4. С. 53–62. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62

26. Третьякова В. А. Динамика распределения деревьев по диаметрам в густых культурах сосны, ели и кедра // Лесоведение. 2005. № 5. С. 72–74. EDN: HTAQFH.

27. Pogoda P., Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland. *Forests*, 2019, issue 10, id 412. DOI: 10.3390/f10050412.

28. Лебедев А. В., Кузьмичев В. В. Верификация трехпараметрических моделей зависимости высоты от диаметра на высоте груди для березовых древостоев Европейской части России // Сибирский лесной журнал. 2020. № 5. С. 45–54. DOI: 10.15372/SJFS20200505

29. Мазуркин П. М., Бедертдинов Э. Н., Русинова Н. В. Оценка компонентного неравномерия древостоя по кривым высот и диаметров растущих деревьев // Успехи современного естествознания. 2009. № 8. С. 23–32.

30. Имитационное моделирование технологического процесса заготовки древесины на примере лесного харвестера / К. П. Рукомойников, Т. В. Сергеева, Т. А. Гилязова [и др.] // Лесной вестник/Forestry Bulletin, 2023. Т. 27. № 3. С. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

31. Смирнова М. В., Титулин А. А. Влияние условий работы на производительность харвестера // Научный Лидер. 2022. № 45 (90). [сайт]. URL: <https://scilead.ru/article/3165-vliyanie-uslovij-raboti-na-proizvoditelnost-k> (дата обращения: 18.04.2026)

32. Плотникова А. С. Шкала природной пожарной опасности лесных экосистем И. С. Мелехова. Обзор современных российских методических подходов // Вопросы лесной науки. 2021. Т. 4, № 2. DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2. EDN: AMVVAC.

References

1. Ispol'zovaniye sistem monitoringa pri fiksatsii napravleniya razvitiya i dinamiki prirodnogo pozhara [Use of monitoring systems in recording the direction of development and dynamics of a natural fire] / A. O. Semenov, D. V. Kalashnikov, A. G. Bubnov [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2025, vol. 4 (57), pp. 57–67. DOI: 10.48612/ntp/a1z6-x9mt-f4rh. EDN: UX-TRZR

2. Moshnikov S. A., Ananyev V. A. Zapas drevesnogo detrita osnovnykh nasazhdeniyakh Yuzhnoy Karelii [Stock of woody detritus in the main plantations of Southern Karelia]. *Trudy Sankt-Peterburgskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta lesnogo khozyaystva*, 2013, issue 2, pp. 22–28.

3. Coarse woody debris in forest regions of Russia / O. Krankina, M. Harmon, Yu. Kukuev [et al.]. *Can. J. For. Res.*, 2002, issue 32, pp. 768–778.

4. Kolichestvennaya otsenka zapasov drevesnogo detrita v lesakh Rossiyskoy Federatsii po dannym GIL [Quantitative assessment of wood detritus reserves in the forests of the Russian Federation according to the State Forest Inventory] [Electronic resource] / N. A. Malysheva, A. N. Filipchuk, T. A. Zolina [et al.]. *Leskhoz. inform.: elektron. setevoy zhurnal*, 2019, issue 1, pp. 101–128. [website]. URL: https://lhi.vniilm.ru/PDF/2019/1/LHI_2019_01-09-Malysheva.pdf (date of access: 18.04.2026)

5. Harakteristika drevostoya i valezha v poslepozharnykh osnovo-berozovykh lesakh Srednego Predural'ya [Characteristics of Stand and Deadwood in Post-fire Pine-birch Forests of the Middle Urals] / A. A. Aleynikov, A. V. Tyurin, P. Ya. Grabarnik [et al.]. *Lesovedenie*, 2018, issue 4, pp. 258–272.

6. Evstigneev O. I., Gornova M. V., Anishchenko L. N. Valezhnik i mikrosuksessii v yel'nike vysokotravnom na nizinnom bolote (Bryanskoye poles'ye) [Deadwood and microsuccessions in a tall-grass spruce forest on a lowland bog (Bryansk Polesie)]. *Russian Journal of Ecosystem Ecology*, 2018, vol. 3, issue 2, pp. 1–16. DOI: 10.21685/2500-0578-2018-2-2. EDN: EIUPWW.

7. Krupnyye drevesnyye ostatki - poteryannaya drevesina ili ekosistemnyye uslugi [Large woody debris - lost wood or ecosystem services] / M. A. Kuznetsov, A. F. Osipov, A. V. Manov [et al.]. *Aktual'nyye problemy, napravleniya i mekhanizmy razvitiya proizvoditel'nykh sil Severa – 2024: sbornik statey Devyatoy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (s mezhdunarodnym uchastiyem). V 2-kh chastyakh, Chast' I*. Voronezh: Stroki, 2024, pp. 295–297. EDN: GDBANN.

8. Kharakteristika krupnykh drevesnykh ostatkov v pikhtovykh nasazhdeniyakh, povrezhdennykh ussuriyskim poligrafom (*Polygraphus proximus* Blandf.) [Characteristics of large woody debris in fir stands damaged by the Ussuri polygraphus (*Polygraphus proximus* Blandf.)] / A. A. Andronova, A. A. Weiss, P. V. Mikhailov [et al.]. *Prirodobustroystvo*, 2026, vol. 19, issue 2, pp. 114–123. DOI: 10.26897/1997-6011-2026-2-114-123. EDN: KUQVWJ.

9. Gusev V. G., Lopukhova E. L., Dubovy V. K. Klassifikatsiya i obshchiye svoystva lesnykh goryuchikh materialov. [Classification and general properties of forest combustible materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Lesnoy zhurnal*, 2012, vol. 1 (325), pp. 134–145.

10. Tsvetkov P. A., Kudinov E. N. Vliyaniye nesploshnykh rubok na pozharoopasnost'

sosnyakov Krasnoyarskoy lesostepi [The influence of partial logging on the fire hazard of pine forests in the Krasnoyarsk forest-steppe]. *Khvoynyye boreal'noy zony*, 2014, vol. 32, issue 3-4, pp. 74–77. EDN: TUIPKH.

11. Effects of post-fire mulching with straw and wood chips on soil hydrology in pine forests under Mediterranean conditions / Manuel García Díaz, Manuel Esteban Lucas-Borja, Javier Gonzalez-Romero [et al.]. *Ecological Engineering*, 2022, vol. 182, 106720, <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106720>. [сайт]. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857422001811> (дата обращения: 18.04.2026)

12. The Use of Wood Chips for Revitalization of Degraded Forest Soil on Young Scots Pine Plantation / Andrzej Klimek, Stanisław Rolbiecki, Roman Rolbiecki [et al.]. *Forests*, 2020, 11 (6), 683; <https://doi.org/10.3390/f11060683>

13. Izmeneniye svoystv pochvy pod vliyaniyem dorozhnogo pokrytiya iz drevesnoy shchepy (v usloviyakh GBS RAN). [Changes in soil properties under the influence of wood chip road surfaces (under conditions of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences)] / T. V. Prokof'eva, K. A. Gorokhov, M. S. Rozanova [et al.]. *Prirodoobustroystvo*, 2025, issue 5, pp. 126–135. (In Russ.) <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-5-126-135>

14. Vliyaniye pokrytiya iz drevesnoy shchepy na pochvy tropinochnoy seti GBS RAN [The influence of wood chip covering on the soils of the path network of the Main Botanical Garden of the Russian Academy of Sciences] / T. V. Prokof'eva, M. S. Rozanova, K. A. Gorokhov [et al.]. *Aktual'nyye problemy urbolesovedeniya: Sbornik nauchnykh trudov Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem, posvyashchennoy 95-letiyu so dnya rozhdeniya chlena-korrespondenta RAN L. P. Ryssina*. Moscow: Glavnyy botanicheskiy sad im. N. V. Tsitsina RAN, 2024, pp. 189–193. DOI: 10.35102/cbg.2024.22.38.039. EDN: INGKNU.

15. Osobennosti prognozirovaniya pozhar-noy opasnosti lesnykh massivov tsentral'noy chasti Rossii [Features of forecasting fire hazard of forests in the central part of Russia] / O. G. Zeinetdinova, I. Yu. Sharabanova, R. M. Shipilov [et al.]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2018, vol. 2 (27), pp. 62–64. EDN: XWXQBV.

16. Semenov A. O., Kalashnikov D. V., Semenov A. D. Osobennosti tusheniya prirodnih pozharov na nachal'nykh etapakh [Features of extinguishing wildfires at the initial stages]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2024, vol. 2 (51), pp. 85–93.

17. Arkhipov E. V. Dinamika nakopleniya lesnykh goryuchikh materialov v osnovnykh lesakh Kazakhskogo melkosopochnika [Dynamics of

accumulation of forest combustible materials in pine forests of the Kazakh Uplands]. *Vestnik Altayskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2014, vol. 9 (119), pp. 64–68. EDN: STSLCV.

18. Protsessy pozharnogo sozrevaniya lesnykh goryuchikh materialov v lesakh Saratovskogo lesnichestva Saratovskoy oblasti [Processes of fire maturation of forest combustible materials in the forests of the Saratov forestry, Saratov region] / M. A. Kozachenko, O. G. Udalova, O. A. Ivchenko [et al.]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2021, issue 9, pp. 5–12. DOI: 10.17513/use.37678. EDN: XMQDTP.

19. Analiz gorimosti lesov Zabaykal'skogo kraya za 2022-2024 gody [Analysis of Forest Combustibility in the Trans-Baikal Territory for 2022-2024] / I. M. Sekerin, A. M. Eritsov, G. V. Kuksin [et al.]. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal*, 2025, vol. 3 (153), 18 p. DOI: 10.60797 / IRJ.2025.153.129. EDN: TYMJFQ.

20. Zalesov S. V., Osipenko A. E., Shubin D. A. Zapasy napochvennykh goryuchikh materialov v iskusstvennykh sosnyakakh Altayskogo kraya [Reserves of ground combustible materials in artificial pine forests of the Altai Territory]. *Vestnik Buryatskoy gosudarstvennoy sel'skokhozyaystvennoy akademii im. V. R. Filippova*, 2016, vol. 2 (43), pp. 73–79. EDN: WAWFFP.

21. Karpachev S. P., Karpacheva I. P. Ustroystvo dlya proizvodstva lesomaterialov na leseoseke [Device for the Production of Timber in a Cutting Area], Patent na poleznuyu model' 196623, Rossiyskaya Federatsiya IPC A 01 G 23/00 (2006.01), opubl. 06.03.2020, Byul. № 7.

22. Modeling of cleaning up forest debris technology from wood natural mortality / S. P. Karpachev, A. A. Shadrin, O. N. Burmistrova [et al.]. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, 839, 012010.

23. Derbin V. M., Derbin M. V., Ovcharuk S. V. Tekhnologiya raboty kharvestera pri vyborochnykh rubkakh [Harvester operation technology for selective logging]. *Aktual'nyye problemy razvitiya lesnogo kompleksa: sbornik materialov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii. Ministerstvo obrazovaniya i nauki RF; Pravitel'stvo Vologodskoy oblasti; Departament lesnogo kompleksa Vologodskoy oblasti; Vologodskiy gosudarstvennyy universitet*. Vologda: Vologodskiy gosudarstvennyy universitet, 2016, pp. 113–114.

24. Karpachev S. P., Bykovskiy M. A., Laptev A. V. Metodika vybora manipulyatora kharvestera [Method of selecting a harvester manipulator]. *Lesnoy vestnik/Forestry Bulletin*, 2021, vol. 25, issue 1, pp. 123–129. DOI: 10.18698/2542-1468-2021-1-123-129

25. Lebedev A. V. Obobshchennaya model' raspredeleniya diametrov derev'ev v

sosnovykh drevostoyakh [Generalized model of pine trees diameter distribution]. *Lesnoy vestnik/Forestry Bulletin*, 2022, vol. 26, issue 4, pp. 53–62. DOI: 10.18698/2542-1468-2022-4-53-62

26. Tretyakova V. A. Dinamika raspredeleniya derev'yev po diametram v gustykh kul'turakh sosny, yeli i kedra [Dynamics of tree distribution by diameter in dense stands of pine, spruce and cedar]. *Lesovedenie*, 2005, issue 5, p. 72

27. Pogoda P., Ochał W., Orzeł S. Modeling Diameter Distribution of Black Alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) Stands in Poland. *Forests*, 2019, issue 10, id 412. DOI: 10.3390/f10050412.

28. Lebedev A. V., Kuzmichev V. V. Verifikatsiya trekhparametricheskikh modeley zavisimosti vysoty ot diametra na vysote grudi dlya berezovykh drevostoyev Yevropeyskoy chasti Rossii [Verification of three-parameter models of dependence of height on the diameter at breast height for birch stands of the European part of Russia]. *Sibirskiy Lesnoj Zhurnal*, 2020, issue 5, pp. 45–54. DOI: 10.15372/SJFS20200505

29. Mazurkin P. M., Bedertdinov E. N., Rusinova N. V. Otsenka komponentnogo neravnovesiya drevostoya po krivym vysot i diametrov rastushchikh derev'yev [Assessment of component disequilibrium of a forest stand based on

the curves of heights and diameters of growing trees]. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*, 2009, issue 8, pp. 23–32.

30. Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskogo protsessa zagotovki drevesiny na primere lesnogo kharvestera [Modeling operation of forest harvester in AnyLogic simulation system] / K. P. Rukomoynikov, T. V. Sergeeva, T. A. Gilyazova [et al.]. *Lesnoy vestnik/Forestry Bulletin*, 2023, vol. 27, issue 3, pp. 69–80. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-3-69-80

31. Smirnova M. V., Titunin A. A. Vliyaniye usloviy raboty na proizvoditel'nost' kharvestera [The Impact of Operating Conditions on Harvester Performance]. *Nauchnyy Lider*, 2022, vol. 45 (90), [website]. URL: <https://scilead.ru/article/3165-vliyanie-usloviy-raboti-na-proizvoditelnost-k> (accessed: 18.04.2026)

32. Plotnikova A. S. *Shkala prirodnoy pozharной opasnosti lesnykh ekosistem I. S. MEL-EKHOVA. Obzor sovremennykh rossiyskikh metodicheskikh podkhodov* [Scale of natural fire hazard of forest ecosystems by I. S. Melekhova. Review of modern Russian methodological approaches]. *Voprosy lesnoy nauki*, 2021, vol. 4, issue 2 «Forest fires», Article No. 83. DOI: 10.31509/2658-607x-202142-2

Карпачев Сергей Петрович

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва,
доктор технических наук, профессор
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Karpachev Sergey Petrovich

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
Doctor of Technical Sciences, Professor
ResearcherID: AАН-8641-2019,
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8509-8956>
E-mail: karpachevs@mail.ru

Токарева Ольга Владимировна

Академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Москва,
доцент кафедры
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0259-0625>
E-mail: oliatok@mail.ru

Tokareva Olga Vladimirovna

Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Russian Federation, Moscow
associate professor
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0259-0625>
E-mail: oliatok@mail.ru